

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Ferhat Abbas- Sétif 1
Institut : Optique et Mécanique de Précision
Département : Mécanique de Précision
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Optique et Mécanique de Précision
Spécialité : Mécanique fine

Mémoire de Master

Etude de comportement à l'impact et à l'indentation des structures en panneaux sandwich à âme en mousse

Etudié par : MOUMOU Hania

Dirigé Par : Dr. ARIANE Khalissa

Pr. KESKES Boualem

Devant le jury :

Dr. Smata lakhdar	(Président)
Dr. Zegadi Akram	(Examineur)

Soutenue le : 11/09/2023

Sommaire

<i>Remerciement</i>	II
Sommaire	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Résumé	X
Introduction générale.....	1
I.1 Introduction	4
I.2 Historique de concept sandwichs	4
I.3 Présentation d'une structure sandwich	5
I.3.1 Les éléments constituant les matériaux sandwichs.....	5
I.3.1.1 Les peaux	6
I.3.1.2 L'âme	6
a) Le nid d'abeilles	7
b) Mousses	7
I.3.1.3 L'interface entre âme et peau.....	8
I.4 La mousse polyuréthane.....	9
I.4.1 Préparation de mousse polyuréthane	9
I.4.2 Type de mousses de polyuréthane.....	10
I.4.3 Propriétés de mousses de polyuréthane et champs d'application	10
I.4.4 Procédés de fabrication des mousses polyuréthane.....	11
• Fabrication par "coulée souple"	11
• Fabrication par "moulage par injection"	11
I.4.5 Utilisations des mousses polyuréthane.....	11
I.5 Avantage de la structure sandwich.....	12
I.6 Conclusion.....	12
II.1 Introduction	14
II.2 Les essais mécaniques	14
II.2.1 Essai de compression	14
II.2.2 Essai de traction	15
II.2.3 Essai de flexion	15
II.3 Modes de rupture des structures sandwich.....	16
II.3.1 Découlement entre peau et l'âme	16

II.3.2	Rupture des peaux en traction ou en compression :	17
II.3.3	Rupture de l'âme en cisaillement	17
II.3.4	Indentation localisée (Poinçonnement)	17
II.3.5	Flambement localisé.....	18
II.4	Essai de l'impact	18
II.4.1	Paramètres influant sur le comportement à l'impact des structures sandwichs .	19
II.4.1.1	Influence de la peau	19
II.4.1.2	Influence de l'âme.....	20
II.4.1.3	Effet de la vitesse de l'impact	21
II.4.1.4	Effet de la géométrie de l'impacteur	22
II.5	Conclusion.....	23
III.1	Introduction	25
III.2	Matériau utilisé.....	25
III.3	Procédures expérimentales	26
III.3.1	Essais de compression	26
III.4	Résultats et discussion.....	28
III.4.1	Essai de compression	28
III.4.1.1	Effet de la vitesse de chargement sur le comportement en compression des panneaux sandwichs en mousse	28
III.4.1.2	Effet de la vitesse de chargement sur le comportement en compression des mousses polyuréthane	30
III.4.1.3	Energie absorbée par le panneau sandwich à âme en mousse polyuréthane 33	
III.4.1.3.1	. Effet de la vitesse de chargement sur l'Energie absorbée par le panneau sandwich	34
III.4.1.3.2	Energie absorbée par le panneau sandwich à âme en mousse polyuréthane (effet de l'épaisseur)	35
III.4.1.4	Comparaison entre le comportement en compression des panneaux sandwichs avec et sans peaux.....	38
III.4.1.5	Retour élastique	41
III.4.2	Essai d'impact	42
III.4.2.1	Effet de l'épaisseur de l'âme de l'échantillon sur le comportement à l'impact 42	
III.4.2.1.1	Impacteur de forme cylindrique	42
III.4.2.1.2	Impacteur de forme sphérique	46
III.4.2.1.3	Impacteur de forme conique	49

III.4.2.2 Effet de la géométrie de l'impacteur sur l'impact des panneaux sandwich à âme en mousse	52
III.4.2.2.1 Epaisseur de l'âme $e=30\text{mm}$	52
III.4.2.2.2 Pour l'épaisseur de l'âme $e=50\text{mm}$	53
III.4.2.3 Effet de la géométrie de l'impacteur sur l'impact des panneaux sandwich à âme en mousse	55
III.4.3 Modes de rupture.....	56
III.5 Conclusion.....	58
Conclusion générale	61
Référence.....	XI

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Les différents constituants d'une structure sandwich	5
Figure I. 2 : Différentes composantes des composites sandwichs	6
Figure I. 3 : Divers matériaux pour les peaux.	6
Figure I. 4: Différents exemples de nids d'abeille	7
Figure I. 5: Mousse en PVC	7
Figure I. 6: bois de Balsa	8
Figure I. 7: Préparation de la mousse polyuréthane	9
Figure I. 8: classification des mousses du polyuréthane	10

Chapitre II

Figure II. 1 : Essai de compression	15
Figure II. 2 : Essai de traction	15
Figure II. 3 : Essai de flexion 4-point	16
Figure II. 4: délaminage entre peau et l'âme	17
Figure II. 5 : Rupture des peaux en traction/compression	17
Figure II. 6: Rupture de l'âme en cisaillement.	17
Figure II. 7 : Mode de rupture par indentation localisée	18
Figure II. 8: Le flambement localisé des peaux.....	18
Figure II. 9 : Courbes charge-déplacement mesurées sous chargement d'impact : a) AHS d=3.2 mm, b) AHS d=6.4 mm, c) AHS d=19.2 mm, d) NHS d=3.2 mm; Di=20 mm	19
Figure II. 10 : Effet de l'épaisseur de la peau sur le mode de rupture sous impact	20
Figure II. 11 : Influence de la densité de l'âme sur la transition entre les modes de rupture d'un sandwich	21
Figure II. 12: Comparaison entre des lois de contact entre des indentateurs cylindriques et sphérique	23

Chapitre III

Figure III. 1 : panneau sandwich à âme en mousse.	25
Figure III. 2 : Montage d'essai de compression.	27
Figure III. 3 : courbe de l'évolution de la force en fonction de déplacement de trois vitesses 50 ,100 et 150 mm/min pour une même épaisseur e=30mm.	29
Figure III. 4: courbe de l'évolution de la force en fonctionne de déplacement de trois vitesses 50 ,100 et 150 mm/min pour une même épaisseur e=40mm.	29
Figure III. 5: courbe de l'évolution de la force en fonction de déplacement de trois vitesses 50 ,100 et 150 mm/min pour une même épaisseur e=50mm.	30
Figure III. 6: résultats de compression pour a) e=30mm,b) e=40mm,c) e=50mm.....	30

Figure III. 7 : courbe de l'évolution de la force en fonction de déplacement pour trois vitesses différentes 50 ,100 et 150mm/min et une épaisseur $e=30\text{mm}$	31
Figure III. 8: courbe de l'évolution de la force en fonction de déplacement pour trois vitesses différentes 50 ,100 et 150mm/min et une épaisseur $e=40\text{mm}$	31
Figure III. 9: courbe de l'évolution de la force en fonctionne de déplacement pour trois vitesses différentes 50 ,100 et 150mm/min et une épaisseur $e=50\text{mm}$	32
Figure III. 10: résultats de compression pour a) $e=30\text{mm}$,b) $e=40\text{mm}$,c) $e=50\text{mm}$	32
Figure III. 11: Détermination de l'énergie absorbée par la mousse.	33
Figure III. 12: diagramme d'évolution de l'énergie absorbe en fonction de la vitesse de chargement 50,100 et 150mm pour les différentes épaisseurs (30, 40 et 50mm).	34
Figure III. 13: diagrammes d'évolution de l'énergie absorbe en fonction de la vitesse de chargement 50,100 et 150 mm pour les différentes épaisseurs (30, 40 et 50mm).	35
Figure III. 14 : diagramme de l'énergie absorbe fonction de l'épaisseur 30 ,40 et 150mm pour les différentes vitesses (50, 100 et 150mm/min).	36
Figure III. 15 : diagramme de l'énergie absorbe fonction de l'épaisseur 30 ,40 et 50pour les différentes vitesses (50, 100 et 150mm/min).	37
Figure III. 16 : diagramme de l'énergie absorbe par la mousse et le panneau pour les vitesses (50, 100 et 150mm/min) et épaisseur $e=30\text{mm}$	38
Figure III. 17: diagramme de l'énergie absorbe par la mousse et le panneau pour les vitesses (50, 100 et 150mm/min) et épaisseur $e=40\text{mm}$	39
Figure III. 18 : diagramme d'évolution de l'énergie absorbe par la mousse et le panneau pour la vitesse 50mm/min et épaisseur $e=50\text{mm}$	40
Figure III. 19: diagramme d'évolution de l'énergie absorbe par la mousse et le panneau pour la vitesse 100mm/min et épaisseur $e=50\text{mm}$	40
Figure III. 20 : diagramme d'évolution de l'énergie absorbe par la mousse et le panneau pour la vitesse 150mm/min et épaisseur $e=50\text{mm}$	41
Figure III. 21 : courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur30 mm avec impacteur cylindrique.	43
Figure III. 22: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 30mm avec impacteur cylindrique.	43
Figure III. 23 : courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40mm avec impacteur cylindrique.	44
Figure III. 24 : courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40mm avec impacteur cylindrique.	44
Figure III. 25: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50mm avec impacteur cylindrique.	45
Figure III. 26: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50mm avec impacteur cylindrique.	45
Figure III. 27: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 30 mm avec impacteur sphérique.	46
Figure III. 28: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 30mm avec impacteur sphérique.	46
Figure III. 29: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40mm avec impacteur sphérique.	47
Figure III. 30: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40mm avec impacteur sphérique.	47

Figure III. 31: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50 mm avec impacteur sphérique.....	48
Figure III. 32: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50mm avec impacteur sphérique	48
Figure III. 33: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 30 mm avec impacteur cône tronque.....	49
Figure III. 34: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 30mm avec impacteur cône tronque.	49
Figure III. 35: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40 mm avec impacteur cône tronque.....	50
Figure III. 36 : courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 40mm avec impacteur cône tronque.	50
Figure III. 37: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50 mm avec impacteur cône tronque.....	51
Figure III. 38: courbe moyenne de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour l'épaisseur 50mm avec impacteur cône tronqué.	51
Figure III. 39: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement par les différentes impacteur pour l'épaisseur $e=30\text{mm}$	52
Figure III. 40: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement par les différentes impacteur pour l'épaisseur $e=40\text{mm}$	53
Figure III. 41: courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement par les différentes impacteur pour l'épaisseur $e=50\text{mm}$	53
Figure III. 42: diagramme de l'évolution de la force maximale en fonction de l'épaisseur 30, 40, 50 mm par l'impacteur sphérique, cylindrique et cône tronque.	55
Figure III. 43: diagramme de l'évolution de la force maximale en fonction des formes d'impacteur.....	56
Figure III. 44 : les modes de rupture pour l'impacteur cône tronqué.	57
Figure III. 45: les modes de rupture pour l'impacteur cylindrique.	57
Figure III. 46: les modes de rupture pour l'impacteur sphérique.	58

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III. 1 : propriétés mécanique de l'âme en mousse polyuréthane	26
Tableau III. 2 : propriétés mécanique de la peau en acier N250	26
Tableau III. 3 : l'énergie absorbe par la mousse	33
Tableau III. 4: l'énergie absorbée par le panneau	33
Tableau III. 5 : le retour mesuré pour le panneau sandwich avec peau	41
Tableau III. 6 : le retour mesuré pour la mousse.....	42
Tableau III. 7 : Les paramètres calcule à partir d'essais d'impacte	54

Résumé

Ce travail présente une étude du comportement mécanique en compression et en impact. L'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres qui ont une influence sur le comportement en compression et en impact à basse vitesse. Le comportement de compression des panneaux sandwichs a été caractérisé par des essais de compression réalisés avec des variations de vitesse de chargement et d'épaisseur de l'âme en mousse polyuréthane. En plus, des tests d'impact avec divers forme géométrique d'impacteurs ont été réalisés afin d'étudier l'influence de la forme de l'impacteur sur la résistance à l'impact du panneau sandwich. Les modes d'endommagement obtenus s'avèrent complexes : indentation de la peau, cisaillement de l'âme,...

Mots clés : panneau sandwich en mousse, impact à basse vitesse, indentation, compression essai d'impact, mousse polyuréthane.

Abstract

This work presents a study of the mechanical behavior under compression and impact. The objective of this study is to identify the parameters that have an influence on the behavior under compression and impact at low speed. The compression behavior of sandwich panels was characterized by compression tests carried out with variations in loading speed and thickness of the polyurethane foam core. In addition, impact tests with various geometric shapes of impactors were carried out in order to study the influence of the shape of the impactor on the impact resistance of the sandwich panel. The resulting damage modes are complex: skin indentation, core shear, etc.

Keywords: foam sandwich panel, low-speed impact, indentation, compression test, polyurethane foam.

Introduction générale

Introduction générale

Les panneaux sandwich composites sont largement utilisés dans des applications industrielles telles que l'aéronautique, les chemins de fer, la marine et le génie civil en raison de leur rapport résistance-poids spécifique élevé, de leurs propriétés légères, de leur amortissement acoustique, de leur résistance élevée aux chocs et de leur isolation thermique élevée. Généralement les panneaux sandwich sont composés de deux peaux rigides et d'une âme légère et épais [1].

Les panneaux sandwich à âme en mousse présentent de bonnes performances en compression en raison de la répartition des charges sur une surface étendue. Lorsqu'on applique une force de compression sur un panneau sandwich à âme en mousse, la mousse de l'âme fonctionne comme une structure alvéolaire qui répartit la charge sur une surface plus large, réduisant ainsi les contraintes locales. Cela permet au panneau de supporter des charges élevées sans subir de déformations excessives [2].

La principale application des panneaux sandwich composites se trouve dans les structures soumises à des charges d'impact faibles ou élevées dans le cadre d'une conception légère. En d'autres termes, les panneaux sandwich composites doivent être conçus pour des applications résistantes aux chocs [2].

L'objet de ce présent travail est d'analyser le comportement mécanique sous compression et en impact à basse vitesse des matériaux sandwichs. Le matériau composite sandwich considéré dans le présent travail est constitué d'une âme en mousse polyuréthane de différentes épaisseurs et de deux peaux en acier.

Notre manuscrit est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur les panneaux sandwichs, Les type de l'âme, les techniques d'élaboration de la mousse polyuréthane, Les avantage et les applications de panneaux sandwich.

Le deuxième chapitre présente le comportement en compression et à l'impact, les modes de rupture et les paramètres influence sur le comportement à l'impact.

Le troisième chapitre présent l'étude expérimentale sur le comportement mécanique en compression et le comportement a l'impact des panneaux sandwich à âme en mousse

polyuréthane. Nous avons étudié l'influence de la vitesse de chargement et l'épaisseur des échantillons sur le comportement en compression. Aussi nous avons étudié l'influence de la géométrie des impacteurs et l'épaisseur des échantillons sur le comportement à l'impact.

Enfin, une conclusion permettra de proposer une synthèse des principaux résultats obtenus.